SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Scuola di Dottorato in Ingegneria Civile ed Architettura

Corso di Dottorato in Ingegneria dell'Architettura e dell'Urbanistica (16162)

Curriculum: Ingegneria Edile Architettura

Ciclo XXXI

A.A. 2017-2018

LA PIETRA MASSIVA NELLA PROGETTAZIONE

Dalle caratteristiche dei materiali alle valenze energetico-architettoniche di involucri lapidei massivi "innovativi"

Dottoranda: Silvia Mariani

Supervisore: Prof. Ing. Marco Ferrero

"Non ci aspettiamo proprio niente dai materiali in sé, ma soltanto dal loro uso corretto. Persino i nuovi materiali non ci garantiscono alcuna superiorità.
Ogni materiale ha solo il valore che da esso sappiamo trarre."[1]

Mies van der Rohe, 1938

[1] La frase è tratta dal "Discorso inaugurale in qualità di direttore del dipartimento di Architettura presso l'Armour Institute of Technology (AIT)" tenuto da Mies van der Rohe il 20 novembre 1938 (In: Neumeyer F (1996) *Ludwig Mies van der Rohe. Le architetture, gli scritti*. Milano: Skira editore, p. 307) (Zerbi, 2009).

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il professor Marco Ferrero per aver condiviso con me la sua esperienza sugli aspetti tecnico-costruttivi delle architetture in pietra e per avermi guidato nell'attività di ricerca con la massima attenzione e disponibilità.

Ringrazio tutti i professori del collegio del Corso di Dottorato in Ingegneria dell'Architettura e dell'Urbanistica per le preziose indicazioni che hanno contribuito a migliorare il lavoro di tesi.

Ringrazio la dottoressa Federica Rosso che mi ha sostenuto da un punto di vista scientifico e umano e che con il suo lavoro è stata per me un esempio da seguire.

Ringrazio in modo speciale i miei genitori che hanno condiviso con me i momenti più belli e quelli più difficili del percorso di Dottorato e che mi hanno sempre incoraggiato e sostenuto.

INDICE RAGIONATO

INDICE DELLE FIGURE **13**

INDICE DELLE TABELLE **19**

ABSTRACT **23**

INTRODUZIONE **25**

Premessa terminologica 25

Motivazioni della ricerca 25

Obiettivi 37

Metodologia e articolazione della ricerca 37

1. ANALISI DELLE DIVERSE TIPOLOGIE DI MATERIALI LAPIDEI **43**

Abstract La pietra è il più antico materiale da costruzione e per secoli ha avuto un ruolo centrale nel progetto di architettura. La conoscenza approfondita delle caratteristiche e delle proprietà delle pietre naturali è necessaria per operare scelte progettuali consapevoli. Attualmente, inoltre, possono essere impiegati nella progettazione anche materiali lapidei artificiali che possono consentire di riprodurre i caratteri dei litotipi naturali per favorire l'integrazione dell'opera di progetto nel contesto. Le ulteriori potenzialità connesse con questi materiali risiedono nella garanzia dell'omogeneità delle caratteristiche e delle proprietà e nella possibilità di ottenere prestazioni superiori rispetto ai litotipi di origine. I materiali artificiali qualora siano realizzati con scarti lapidei, presentano, inoltre, benefici ambientali.

Il capitolo sintetizza le conoscenze di base sui materiali lapidei naturali ed artificiali. Lo studio delle pietre naturali viene sviluppato a partire dalle classificazioni geologiche e merceologiche e prosegue con l'analisi delle proprietà tecniche dei diversi litotipi. Relativamente ai materiali lapidei artificiali, l'analisi ricomprende i lapidei agglomerati a matrice cementizia e resinosa ed i calcestruzzi ottenuti dagli scarti di estrazione o di lavorazione della pietra naturale impiegati come aggregati o in parziale sostituzione del legante cementizio.

1.1. LE PIETRE NATURALI 43

1.1.1. Classificazioni 43

1.1.1.1. La classificazione geologica 43

1.1.1.2. Classificazione merceologica 45

1.1.2. Proprietà tecniche, prestazioni e caratteristiche delle pietre naturali 46

1.1.2.1. Colore 49

1.1.2.2. Durabilità 49
1.1.2.3. Lavorabilità 53
1.1.2.4. Proprietà meccaniche 55
1.1.2.5. Peso specifico e peso di volume delle pietre 56
1.1.2.6. Porosità e permeabilità 57
1.1.2.7. Proprietà termiche 58
1.1.2.8. Resistenza all'usura o logorabilità 58

1.2. MATERIALI ARTIFICIALI DERIVATI DALLA PIETRA 60
1.2.1. Calcestruzzi ottenuti da scarti di estrazione o lavorazione della pietra 60
1.2.2. I lapidei agglomerati 61

2. ANALISI DELLE TECNICHE DI LAVORAZIONE PER LA PRODUZIONE DI PRODOTTI LAPIDEI 67

Abstract La conoscenza delle tecniche di lavorazione applicabili per realizzare prodotti lapidei è essenziale per la comprensione della varietà dei possibili esiti architettonici e dei limiti posti alla progettazione. Inoltre, consente di selezionare il tipo di attrezzatura o di trattamento più adatti al materiale impiegato.
Il capitolo descrive sinteticamente le tecniche di lavorazione tradizionali delle pietre naturali e approfondisce le fasi attuali di trasformazione dei lapidei (riquadratura, segagione, taglio e rifilatura, trattamento superficiale) evidenziando anche le caratteristiche dei macchinari impiegati. Esamina, inoltre, le fasi di produzione dei lapidei agglomerati.

2.1. LA LAVORAZIONE DELLE PIETRE NATURALI 67
2.1.1. Cenni storici 67
2.1.2. Le tecniche attuali di lavorazione 69
2.1.2.1 Riquadratura 69
2.1.2.2. Segagione 70
2.1.2.3. Taglio e rifilatura 72
2.1.2.4. Tagli e lavorazioni speciali 73
2.1.2.5. Trattamenti superficiali 73

2.2. LA LAVORAZIONE DEI LAPIDEI AGGLOMERATI 75
2.2.1. Le tecniche di fabbricazione 75
2.2.2. Le fasi di produzione in impianti basati su tecnologie di vibrocompressione 75
2.2.2.1. La preparazione dell'impasto 76
2.2.2.2. La formatura 76
2.2.2.3. L'indurimento 78
2.2.2.4. La finitura 78

3. ANALISI DEI METODI E DEGLI STRUMENTI INNOVATIVI PER LA PROGETTAZIONE E LA REALIZZAZIONE DI ARCHITETTURE IN PIETRA 83

Abstract Nella cultura architettonica contemporanea c'è stata una riscoperta della pietra massiva attraverso il recupero e l'attualizzazione di tecniche costruttive tradizionali o la diffusione di tecniche innovative. Questo rinnovamento del linguaggio architettonico è stato consentito dalle molteplici innovazioni che hanno interessato il settore lapideo. Le tecnologie digitali, infatti, hanno messo a disposizione dei progettisti nuovi metodi e strumenti per la modellazione computazionale e per il *form-finding* che sono stati applicati anche a strutture ad arco o a volta in pietra estendendo le potenzialità della tradizionale tecnica stereotomica che per secoli è stata il fondamento per disegnare e costruire spazi voltati: il passaggio dalla stereotomia alla stereotomia digitale legata anche a *software* di progettazione parametrica e a metodi di *form-finding* basati non più su modelli fisici ma su modelli digitali e la disponibilità di programmi di calcolo hanno ampliato le possibilità di ricerca formale dei progettisti e hanno reso possibile attualizzare strutture ad arco o a volta in conci di pietra. Inoltre, le tecniche tradizionali di lavorazione impiegate nel settore lapideo sono state profondamente innovate consentendo di realizzare prodotti lapidei di forma complessa con tempi e costi di fabbricazione ridotti, impiegando in modo efficiente il materiale o recuperando gli scarti. L'innovazione più importante per la realizzazione di prodotti lapidei è legata all'introduzione dei sistemi integrati CAD/CAM/CNC e alla stampa 3D: queste tecnologie, infatti, hanno consentito di rimuovere molte delle limitazioni al progetto di architetture in pietra e hanno reso possibili nuovi linguaggi basati sull'attualizzazione di elementi tecnici tradizionali in conci di pietra.
Il capitolo sistematizza i risultati di alcune ricerche innovative finalizzate al progetto e alla costruzione in pietra massiva. In particolare, vengono indagate le rinnovate valenze progettuali della stereotomia ed il suo legame con la topologia e con la modellazione informatica indiretta eseguita attraverso *software* parametrici, fornendo anche un quadro di riferimento storico per comprendere l'evoluzione della disciplina. Vengono, inoltre, analizzati alcuni metodi computazionali di analisi strutturale e di *form-finding* tra cui il *Particle-Spring System* e il *Thrust Network Analysis*. Vengono esposte, infine, le potenzialità dei sistemi CAD/CAM/CNC e della stampa 3D.

3.1. METODI E STRUMENTI INNOVATIVI DI PROGETTAZIONE 83

3.1.1. Stereotomia 83
3.1.1.1. Cenni storici 83
3.1.1.2. Le ricerche 85
3.1.2. Metodi computazionali di *form-finding* e di analisi strutturale 90
3.1.2.1 Cenni storici 90
3.1.2.1.1. Le prime teorie statiche per l'analisi di strutture in pietra tradizionali 90
3.1.2.1.2. I metodi di *form-finding* basati su modelli fisici 92
3.1.2.2. Le ricerche 93

3.2. SISTEMI INNOVATIVI DI REALIZZAZIONE DI PRODOTTI LAPIDEI 99

3.2.1. Sistemi integrati CAD/CAM/CNC lavoranti per asportazione di materiale 99
3.2.1.1. Tipologie di macchine CNC lavoranti per asportazione di materiale 100
3.2.1.2. Le ricerche 101

3.2.2. La stampa 3D 102
3.2.2.1. Cenni storici 102
3.2.2.2. Le ricerche 103

4. ANALISI DELLE TECNICHE COSTRUTTIVE CONTEMPORANEE ATTRAVERSO CASI DI STUDIO 109

Abstract Nella cultura architettonica contemporanea, accanto alle tendenze di assottigliamento della materia lapidea, c'è stata una riscoperta della pietra massiva attraverso il recupero e l'attualizzazione della tecnica costruttiva tradizionale della muratura e la diffusione di tecniche innovative come quelle della pietra armata e dei gabbioni, adottate per realizzare pareti perimetrali e strutture in elevazione. Il rinnovamento del linguaggio architettonico è legato al riconoscimento delle potenzialità della pietra massiva connesse a valori espressivi e di sostenibilità economica e ambientale. L'uso massivo della pietra naturale, infatti, è motivato non solo dall'esigenza di integrarsi con il paesaggio, reinterpretare la cultura costruttiva tradizionale ed esprimere l'identità locale ma anche dalla possibilità di realizzare con costi e tempi di costruzione contenuti elementi tecnici durevoli, dotati di elevata inerzia termica, facilmente riciclabili o ottenuti attraverso il recupero o il riciclo di materiale lapideo di scarto. Le potenzialità della pietra massiva sono state valorizzate anche attraverso lo sviluppo di soluzioni tecniche di involucro che, rispetto alla cultura costruttiva lapidea tradizionale, presentano dei caratteri innovativi dal punto di vista tecnico, prestazionale e/o linguistico.
Il capitolo traccia sinteticamente l'evoluzione storica delle tecniche costruttive della muratura, della pietra armata e dei gabbioni. Descrive, inoltre, le diverse soluzioni costruttive adottate nella cultura architettonica contemporanea evidenziandone le valenze espressive e prestazionali attraverso il riferimento a opere di rilievo nazionale ed internazionale. Il capitolo comprende, infatti, delle schede di analisi delle opere selezionate come casi di studio: le schede riportano la descrizione dell'edificio, il tipo di materiale lapideo impiegato, l'analisi della tecnica costruttiva prescelta e le motivazioni che hanno condotto i progettisti ad impiegare un determinato tipo di materiale o di soluzione costruttiva. Il capitolo sintetizza, infine, le potenzialità e i caratteri innovativi delle soluzioni di involucro adottate nei casi di studio rispetto ai sistemi murari tipici della cultura costruttiva lapidea tradizionale.

4.1. SISTEMI MURARI 109
4.1.1. Cenni storici 109
4.1.2. Muri portanti a conci di pietra 110
4.1.3. Muri portanti a tecnologia mista 112
4.1.4. Muri autoportanti di tamponatura o di paramento 113
4.1.5. Schede di analisi di casi di studio 115

4.2. LA PIETRA ARMATA 152
4.2.1. Cenni storici 152
4.2.2. Le ricerche contemporanee 154
4.2.3. Schede di analisi di casi di studio 157

4.3. GABBIONI 171
4.3.1. Cenni storici 171
4.3.2. Le ricerche contemporanee e le potenzialità della tecnica costruttiva 173
4.3.3. Schede di analisi di casi di studio 175

4.4. ELEMENTI EMERSI DALL'ANALISI DEI CASI DI STUDIO 197
4.4.1. Riscoperta e potenzialità degli involucri in pietra massiva 197
4.4.2. Innovatività degli involucri lapidei massivi contemporanei rispetto alla cultura costruttiva lapidea tradizionale 198

5. ANALISI DELLE PRESTAZIONI TERMICO-ENERGETICHE DI INVOLUCRI LAPIDEI MASSIVI INNOVATIVI 203

Abstract Gli involucri lapidei massivi presentano delle potenzialità connesse a valori di sostenibilità ambientale che hanno contribuito al rinnovamento linguistico della cultura architettonica contemporanea. In particolare, l'impiego del materiale lapideo in spessori rilevanti permette di realizzare elementi costruttivi dotati di elevata inerzia termica, proprietà essenziale per il miglioramento delle condizioni di comfort termico interno e per la riduzione della domanda energetica per il riscaldamento e il raffrescamento degli edifici. Nel capitolo viene verificato che, in termini di consumo energetico, involucri lapidei innovativi sviluppati dalla cultura architettonica contemporanea presentano dei vantaggi rispetto a involucri lapidei tradizionali a corpo unico, sia nella stagione estiva che in quella invernale. In termini di comfort termico interno, inoltre, la prestazione invernale delle soluzioni costruttive contemporanee è risultata migliore di quella tipica degli involucri tradizionali mentre nella stagione estiva gli svantaggi quantificati per le temperature operative, il tempo di ritardo e il valore di attenuazione sono contenuti. È stato mostrato, infine, che i vantaggi prestazionali degli involucri innovativi non sono relativi ad una specifica zona climatica del territorio nazionale ma possono essere ottenuti in differenti contesti geografici italiani.
Il capitolo riassume le prescrizioni e le indicazioni normative relative all'inerzia termica e sintetizza i risultati, gli approcci di calcolo e le metodologie di ricerche relative all'influenza di questa proprietà sulla prestazione termico-energetica degli edifici. Analizza, inoltre, il comportamento delle soluzioni costruttive innovative di involucro adottate nelle opere di Zumthor, Abril e Bernhard analizzate nel capitolo 4, in rapporto a quello di involucri tradizionali in muratura lapidea a corpo unico per valutarne i benefici in termini di comfort termico e di consumo energetico. Lo studio prestazionale viene condotto su un edificio residenziale di progetto attraverso simulazioni dinamiche annuali, variando il contesto geografico di riferimento. La validazione viene effettuata per il caso tradizionale di riferimento attraverso la comparazione dei risultati ottenuti con la simulazione dinamica e con un'analisi semplificata in regime stazionario.

5.1. INERZIA TERMICA 203
5.1.1. Definizione e importanza nella storia dell'architettura 203
5.1.2. Riferimenti normativi 203
5.1.2.1. Legislazione italiana 203

5.1.2.2. Norme tecniche 205
5.1.3. Ricerche su involucri edilizi ad elevata inerzia termica 206
5.1.3.1. L'inerzia termica in rapporto con la prestazione termico-energetica degli edifici .. 206
5.1.3.2. Approcci di calcolo 207
5.1.3.3. Metodologia adottata 209

5.2. EFFICIENZA PRESTAZIONALE DI INVOLUCRI INNOVATIVI IN PIETRA MASSIVA IN RAPPORTO ALLE TECNICHE TRADIZIONALI DELL'EDILIZIA STORICA 211

5.2.1. Introduzione 211
5.2.2. Metodologia 211
5.2.3. Risultati e discussione 215
5.2.3.1. Risultati dell'analisi in regime stazionario e dinamico sul caso di riferimento e validazione del modello 215
5.2.3.2. Risultati dell'analisi comparativa in regime dinamico 216
5.2.4. Conclusioni 221

5.3. STUDIO DELLE PRESTAZIONI DI INVOLUCRI INNOVATIVI E TRADIZIONALI IN PIETRA MASSIVA IN DIVERSE CONDIZIONI CLIMATICHE 222

5.3.1. Metodologia 222
5.3.2. Risultati e discussione 223
5.3.2.1. Prestazioni degli involucri studiati nelle condizioni climatiche di Bologna 223
5.3.2.2. Prestazioni degli involucri studiati nelle condizioni climatiche di Catania 229
5.3.3. Raffronto tra i risultati ottenuti nei diversi contesti di studio 235
5.3.4. Conclusioni 239

6. ANALISI DI INVOLUCRI EDILIZI A GABBIONI 243

Abstract La tecnica dei gabbioni introdotta in architettura dalla fine del XX secolo, presenta numerose potenzialità espressive e prestazionali per la realizzazione di involucri edilizi. Risulta applicabile, infatti, a diverse tipologie edilizie e consente di recuperare o riciclare scarti lapidei di estrazione o demolizione e di definire pareti perimetrali ad alta inerzia termica. Inoltre, la varietà della forma, della dimensione, dei colori e della disposizione degli elementi lapidei di riempimento e l'accostamento con altri materiali costituenti l'involucro edilizio consentono di ottenere molteplici esiti architettonici.

Il capitolo analizza la prestazione termico-energetica di involucri multistrato a gabbioni in diversi contesti geografici di riferimento attraverso simulazioni dinamiche annuali. L'analisi prestazionale viene condotta sul medesimo edificio residenziale di progetto modellato nel capitolo 5, variando lo spessore dei gabbioni, la tipologia di pietra impiegata per il riempimento dei moduli costruttivi, la percentuale dei vuoti e la stratigrafia di parete. La comparazione tra le diverse soluzioni studiate e la definizione di correlazioni tra le caratteristiche dell'elemento costruttivo e la prestazione termico-energetica dell'edificio, fornisce indicazioni per valutare l'appropriatezza delle scelte compiute in fase di progettazione dell'involucro al fine di minimizzare la domanda energetica per il riscaldamento

e il raffrescamento degli edifici e migliorare le condizioni di comfort termico interno nel clima mediterraneo.
Il capitolo descrive, inoltre, i caratteri architettonici di involucri edilizi a gabbioni legati alle possibili tipologie di *texture* del riempimento litico dei moduli costruttivi e alle specifiche soluzioni tecniche progettate per la risoluzione di problemi connessi con l'inserimento di aperture vetrate o di altri materiali di rivestimento e con lo smaltimento dell'acqua piovana. L'analisi viene sviluppata attraverso il riferimento ad architetture contemporanee e l'individuazione di analogie figurative con opere e manufatti realizzati con tecniche costruttive tradizionali.

6.1. ANALISI PRESTAZIONALE DI INVOLUCRI MULTISTRATO A GABBIONI 243
6.1.1. Involucri multistrato a gabbioni 243
6.1.1.1. Motivazioni 243
6.1.1.2. Caratteristiche correlate alla prestazione termico-energetica 247
6.1.2. Indicazioni per la progettazione di involucri a gabbioni in clima mediterraneo 249
6.1.2.1. Metodologia e definizione dei casi di studio 249
6.1.2.2. Valutazione della prestazione energetica 254
6.1.2.3. Valutazione della prestazione termica 264
6.1.2.4. Conclusioni e indicazioni progettuali 278

6.2. CARATTERI ARCHITETTONICI DI INVOLUCRI EDILIZI A GABBIONI 282
6.2.1. Texture del riempimento litico 282
6.2.2. Aspetti applicativi e costruttivi 289

7. CONCLUSIONI 299

Abstract La ricerca, oltre ad esaminare le tipologie e le caratteristiche dei materiali lapidei impiegabili nella progettazione e a sistematizzare le conoscenze relative alle diverse tecniche di lavorazione, ha evidenziato come nella cultura architettonica contemporanea ci sia stata una riscoperta della pietra massiva attraverso la diffusione delle tecniche costruttive della muratura, della pietra armata e dei gabbioni. È emerso che il rinnovamento del linguaggio architettonico è stato consentito dalle molteplici innovazioni che hanno interessato il settore lapideo, in particolare dalla diffusione dei sistemi integrati CAD/CAM/CNC, dal passaggio dalla stereotomia alla stereotomia digitale e dalla disponibilità di metodi di *form-finding* basati su modelli digitali. La ricerca ha evidenziato, inoltre, come questo rinnovamento linguistico sia legato anche al riconoscimento delle potenzialità della pietra massiva, connesse a valori espressivi e di sostenibilità economica ed ambientale. Lo studio delle tecniche costruttive contemporanee della muratura, della pietra armata e dei gabbioni, ha rilevato che le potenzialità della pietra massiva sono state valorizzate anche attraverso lo sviluppo di soluzioni tecniche di involucro che, rispetto alla cultura costruttiva lapidea tradizionale, presentano dei caratteri innovativi dal punto di vista tecnico, prestazionale e/o linguistico: la maggior parte degli involucri lapidei contemporanei, infatti, reinterpreta le valenze espressive della cultura costruttiva lapidea tradizionale senza adottare un approccio storicistico ed è stata progettata secondo il principio del corpo multiplo. La ricerca ha approfondito lo studio delle

potenzialità prestazionali connesse con l'elevata inerzia termica degli involucri contemporanei realizzati secondo la tecnica della muratura e dei gabbioni. Attraverso simulazioni dinamiche annuali, è stato dimostrato che le soluzioni tecniche attuali a corpo multiplo superano le carenze prestazionali delle murature storiche a corpo unico e mantengono le potenzialità connesse con gli attributi di massività ed elevata inerzia termica nonostante il cambiamento del principio costruttivo alla base della progettazione. È stato verificato in tre diversi contesti climatici che le soluzioni di involucro contemporanee consentono una riduzione significativa dei consumi energetici per il riscaldamento e il raffrescamento, garantiscono un miglioramento del comfort termico interno nella stagione invernale rispetto alle soluzioni tradizionali e permettono di mantenere le temperature superficiali interne delle pareti più stabili rispetto a quelle esterne nella stagione estiva. La ricerca è stata approfondita in relazione agli involucri multistrato a gabbioni dal punto di vista della prestazione termico-energetica e dei caratteri architettonici. Attraverso la comparazione dei risultati di simulazioni dinamiche annuali, è emerso che la tipologia di pietra di riempimento e il tipo di stratigrafia influiscono maggiormente sulla prestazione termico-energetica dell'involucro rispetto allo spessore e alla porosità dei moduli costruttivi e che, nei contesti caratterizzati dal clima mediterraneo, dovrebbero essere privilegiate soluzioni tecniche con isolante posto all'esterno e riempimento in materiali lapidei di colore scuro e ad alta densità. Dall'analisi dei caratteri architettonici, è emerso che gli involucri a gabbioni si prestano alla progettazione di edifici che, per la *texture* del riempimento litico dei moduli costruttivi, richiamano le costruzioni storiche in muratura lapidea irregolare e che al contempo, per la combinazione con altri materiali, fanno riferimento al linguaggio architettonico attuale. La definizione di un equilibrio tra il carattere espressivo tradizionale e contemporaneo appare possibile, però, solo a patto di definire soluzioni costruttive specifiche che risolvano i problemi connessi con l'inserimento di aperture vetrate o di altri materiali di rivestimento e con lo smaltimento dell'acqua piovana.

Il lavoro di ricerca presenta diverse possibilità di sviluppo e approfondimento futuri. L'analisi della prestazione termico-energetica di involucri a gabbioni, in particolare, può essere sviluppata attraverso una caratterizzazione sperimentale delle due tipologie di pietra considerate per il riempimento dei moduli costruttivi e attraverso la misurazione dell'assorbanza e dell'emissività su campi di prova ricoperti da frammenti lapidei a diversa granulometria. Un ulteriore approfondimento sperimentale potrebbe essere condotto su un modulo costruttivo a gabbioni al fine di valutare l'influenza dei fenomeni di imbibizione della pietra sui processi di scambio termico.

7.1. RISULTATI 299

7.2. POSSIBILI SVILUPPI E APPROFONDIMENTI DELLA RICERCA 304

GLOSSARIO 305

BIBLIOGRAFIA 307

SITOGRAFIA 321

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1 Un edificio con involucro in muratura lapidea e ammorsature d'angolo realizzate con grandi elementi squadrati di pietra 25
Fig. 2 La Neue Staatgalerie progettata da Stirling e Wilford e il dettaglio della parete del garage .. 27
Fig. 3 Il centro culturale a Sines e il Rettorato della Universidade Nova di Lisbona progettati da Manuel e Francisco Aires Mateus; il Centro Galego de Arte Contemporanea progettato da Siza 27
Fig. 4 Vista di un setto del Museo della Fondazione Beyeler Riehen progettato da Renzo Piano; la facciata della sede del Laboratorio Prove Materiali dello IUAV progettata da Francesco Venezia . 27
Fig. 5 L'edificio per appartamenti ed uffici Bewag progettato da Max Dudler e vista di dettaglio della facciata ventilata con rivestimento in lastre sottili di arenaria grigia e ancoraggi a vista; il centro culturale di Federation Square progettato da Lab architecture studio e vista di dettaglio della facciata con rivestimento in arenaria, vetro e acciaio zincato 28
Fig. 6 L'edificio sede dell'Unione delle Banche Svizzere progettato da Mario Botta 28
Fig. 7 Gli Uffici del Presidente, edificio progettato da Gruber + Kleine - Kraneburg; la Biblioteca Regionale progettata a Dresda dallo studio Ortner & Ortner 29
Fig. 8 La parete in alabastro della Caja De Ahorros progettata da Alberto Campo Baeza (a); le pareti in onice del municipio di San Fernando de Henares progettato da Sancho-Madridejos (b); la parete diaframma in marmo bianco dell'Istitut du Monde Arabe progettato da Jean Nouvel (c) 29
Fig. 9 Gli involucri traslucidi del Christ Pavilion progettato da Von Gerkan, Marg & Partners e della sede della Deutsche Bundesbank progettata a Chemnitz da Lluis Mateo con MAP Architects 30
Fig. 10 Vista dell'interno delle cantine progettate a Vauvert da Perraudin caratterizzate da muri portanti in pietra; la cappella progettata da Eduardo Souto de Moura per la XVI Biennale di Architettura di Venezia 30
Fig. 11 Particolare del prospetto laterale delle terme di Vals progettate da Zumthor; il prospetto principale della Casa a Bom Jesus progettata da Souto de Moura 31
Fig. 12 Il prospetto principale del municipio di Iragna progettato da Cavadini; il prospetto sud della casa privata progettata a Séniergues da Gouwy, Grima, Rames 31
Fig. 13 Dettaglio della muratura lapidea del Scuola di Alti Studi Musicali della Galizia progettata da Abril; vista dell'esterno della Stone House progettata da Herzog & de Meuron 31
Fig. 14 Vista dell'interno dell'Aula Liturgia Padre Pio durante la costruzione e dettaglio degli archi in pietra armata progettati da Renzo Piano 32
Fig. 15 L'edificio per uffici progettato a Finsbury Square da Eric Parry e il Queen's Building progettato da Michael Hopkins caratterizzati da pilastri in pietra armata 32
Fig. 16 Viste dell'esterno dell'House in the Landscape progettata dallo Studio Kropka e dell'edificio residenziale Sei Unità di Guarnieri e Mascazzini caratterizzati da un involucro a gabbioni 32
Fig. 17 Vista dell'esterno della Dominus Winery progettata da Herzog & de Meuron caratterizzata da una muratura in gabbioni; particolari dei prospetti della casa privata Haus 9x9 progettata da Titus Bernhard e dell'edificio residenziale Château-Le-Lez progettato da Edouard François and Associates caratterizzati da un involucro a gabbioni 33
Fig. 18 Quote di mercato all'export nel settore mondiale della pietra naturale di Italia e Cina 36
Fig. 19 Localizzazione delle cave di pietra naturale in Europa 36
Fig. 20 Granito bianco sardo, granito bianco Montorfano e granito rosa Nule 44
Fig. 21 Travertino classico, travertino romano noce, peperino rosa 44
Fig. 22 Marmo arabescato Cervaiole, marmo calacatta macchia oro, marmo fior di pesco carnico . 45
Fig. 23 La macchina di Germain Soufflot (1775) e la macchina di Rondelet (1787) 48

Fig. 24 Scarti di estrazione della pietra naturale 60
Fig. 25 Texture agglomerate in quarzo-resina, con inserti di diverso tipo per Stone Italiana Spa. ... 62
Fig. 26 Lastre di quarzo e resina traslucide e retroilluminate, Santamargherita con Pongratz Perbellini Architects, Vincenzo Pavan e Fabrizio Mirandola, Marmomacc 2006 63
Fig. 27 Lo sbozzo grossolano 67
Fig. 28 Lo sbozzo dettagliato 68
Fig. 29 Macchina di taglio dei blocchi: il telaio monolama 70
Fig. 30 Segagione di un blocco di marmo con telaio multilama: visione inferiore e superiore alle mute di taglio 71
Fig. 31 Macchina tagliablocchi in azione 72
Fig. 32 Macchina di taglio *water-jet* in azione su un elemento architettonico di granito 73
Fig. 33 Vista di una camera di vibrocompattazione 75
Fig. 34 Vista di un impianto di mescolazione; mescolatrice ad assi orizzontali sottovuoto 76
Fig. 35 Le casseforme per la formatura in blocchi 77
Fig. 36 Vista di una pressa per la formatura degli agglomerati in lastre 77
Fig. 37 Vista del forno a piani per l'indurimento a caldo delle lastre 78
Fig. 38 Telai per la segagione di blocchi in lastre 79
Fig. 39 Una macchina calibratrice a rulli e una linea di macchine per la finitura delle lastre 79
Fig. 40 Frontespizio de *Le Premiere Tome de l'Architecture*, Philibert De l'Orme, 1567 83
Fig. 41 Foto dei trattati di Jacques Curabelle e Girard Desargues 84
Fig. 42 Frontespizio del trattato di A. F. Frézier 84
Fig. 43 Volta stereotomica su pianta esagonale 85
Fig. 44 I brevetti della volta piana di Abeille (1699) e di Truchet (1704); trasformazioni delle volte piane di Abeille e Truchet in volte a botte 87
Fig. 45 Processo parametrico-variazionale applicato ad una semisfera per mezzo del *software* Grasshopper 88
Fig. 46 Disegni e realizzazione del Portale Abeille 88
Fig. 47 Arco catenario e colonna a conci osteomorfi 89
Fig. 48 I diagrammi reciproci e il guscio tridimensionale ottenuto come soluzione attraverso il metodo TNA 95
Fig. 49 Schermate del plug-in RhinoVAULT 96
Fig. 50 L'Armadillo Vault esposta alla Biennale di Venezia 2016 e progettata con RhinoVAULT dal gruppo di ricerca del professor Block dell'ETH di Zurigo 97
Fig. 51 Macchina a controllo numerico (tagliatrice a filo diamantato) in azione; elementi curvi in massello dopo le operazioni di taglio 99
Fig. 52 Rappresentazione schematica di una tagliatrice a filo diamantato a 4 assi a controllo numerico 101
Fig. 53 I filamenti in PLA (B) e in materiale composito basato su PLA e polvere di pietra leccese (C) prodotti attraverso un estrusore (A) per essere utilizzati in processi di stampa per deposizione 104
Fig. 54 Il padiglione Radiolaria progettato da A. Morgante e la stampante D-Shape3D 105
Fig. 55 La CasaTuttaDiUnPezzo progettata da Ferreri per la Triennale di Milano del 2010 105
Fig. 56 Il cantiere del quartiere costruito a Sarcelles (Val-d'Oise) da Labourdette e Boileau fra 1955 e 1970 111
Fig. 57 Sezione e dettaglio assonometrico di una parete realizzata con la tecnica "*form-moulded stone*" 113

Fig. 58 Dettaglio di una parete dell'edificio per uffici realizzato a Niort da Hervé Beaudouin con la tecnica "*form-moulded stone*"; foto della parete in costruzione 113
Fig. 59 La passerella in marmo armato precompresso realizzata a Carrara nel 1965: vista e sezione 153
Fig. 60 La trave precompressa realizzata a Carrara nel 1965 153
Fig. 61 La scala di accesso agli uffici della Sovrintendenza ai monumenti di Verona 154
Fig. 62 Particolare degli archi in pietra armata del Padiglione del Futuro progettati da Rice 155
Fig. 63 Muro in gabbioni realizzato nella stazione ferroviaria di Perca-Plan de Corones (Bz) 171
Fig. 64 Muro di contenimento a gabbioni (Royal Tunbridge Wells, Kent) 173
Fig. 65 La sede del Centro Ricerche Agronomiche di Reims e l'edificio CESNAC all'aeroporto di Bordeaux, progettati da Bertrand Bonnier 174
Fig. 66 Indicatori dell'inerzia termica 208
Fig. 67 Planimetrie, prospetto e sezione dell'edificio di progetto 212
Fig. 68 I casi di simulazione: riferimenti, stratigrafie, spessore totale, trasmittanza 213
Fig. 69 Consumo energetico annuale per il riscaldamento 216
Fig. 70 Consumo energetico annuale per il raffrescamento 217
Fig. 71 Calore scambiato dalle pareti con l'ambiente esterno durante l'anno 217
Fig. 72 Le temperature operative registrate all'interno dell'edificio nelle diverse ore di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) e di un tipico giorno estivo (31 Luglio) 218
Fig. 73 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso T[60] 219
Fig. 74 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Zum] 219
Fig. 75 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Abr] 220
Fig. 76 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Ber] 220
Fig. 77 Le temperature annuali esterne a bulbo secco, input delle simulazioni eseguite nei contesti di studio di Grosseto, Bologna e Catania, valutate su base oraria 222
Fig. 78 Consumo energetico annuale per il riscaldamento 224
Fig. 79 Consumo energetico annuale per il raffrescamento 224
Fig. 80 Calore scambiato dalle pareti con l'ambiente esterno durante l'anno 225
Fig. 81 Le temperature operative registrate all'interno dell'edificio nelle diverse ore di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) e di un tipico giorno estivo (31 Luglio) 225
Fig. 82 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso T[60] 226
Fig. 83 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Zum] 226
Fig. 84 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Abr] 227
Fig. 85 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Ber] 227
Fig. 86 Consumo energetico annuale per il riscaldamento 229
Fig. 87 Consumo energetico annuale per il raffrescamento 230
Fig. 88 Calore scambiato dalle pareti con l'ambiente esterno durante l'anno 230

Fig. 89 Le temperature operative registrate all'interno dell'edificio nelle diverse ore di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) e di un tipico giorno estivo (31 Luglio) 231
Fig. 90 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso T[60] 232
Fig. 91 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Zum] 232
Fig. 92 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Abr] 233
Fig. 93 Gli andamenti delle temperature superficiali interne ed esterne registrate il 31 Luglio, relativi al caso I[Ber] 233
Fig. 94 Consumo energetico annuale per il riscaldamento calcolato per i tre contesti di studio 235
Fig. 95 Consumo energetico annuale per il raffrescamento calcolato per i tre contesti di studio 236
Fig. 96 Le temperature operative giornaliere medie dei diversi casi nei tre contesti di studio, valutate in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) 237
Fig. 98 I valori di attenuazione (*f*) dei diversi casi nei tre contesti di studio, valutati considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio) 238
Fig. 99 I valori del tempo di ritardo φ valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione nei tre contesti di studio, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio) 239
Fig. 100 House in the Landscape 244
Fig. 101 Gabions House 244
Fig. 102 Westcliff-Estate 244
Fig. 103 Vista dell'esterno della residenza Base Camp 245
Fig. 104 Villa a Garrigàs 245
Fig. 105 Gli alloggi Château-le-lez 245
Fig. 106 Sei Unità 246
Fig. 107 Blackrock Police Training Centre 246
Fig. 108 Il Conference Building dell'Earth Centre e la Prayer room di Kwait City 246
Fig. 109 Orfanotrofio Falatow Jigiyaso 247
Fig. 110 Nestlé Waters 247
Fig. 111 Energia annuale per il riscaldamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 254
Fig. 112 Energia annuale per il riscaldamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 255
Fig. 113 Energia annuale per il raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 257
Fig. 114 Energia annuale per il raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 258
Fig. 115 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 260
Fig. 116 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 261
Fig. 117 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento nel contesto di Grosseto 262
Fig. 118 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento nel contesto di Bologna 263
Fig. 119 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento nel contesto di Catania 264
Fig. 120 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 265
Fig. 121 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 266

Fig. 122 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per il contesto di Grosseto 267
Fig. 123 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per il contesto di Bologna 268
Fig. 124 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per il contesto di Catania 268
Fig. 125 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 269
Fig. 126 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 270
Fig. 127 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per il contesto di Grosseto 271
Fig. 128 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per il contesto di Bologna 272
Fig. 129 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per il contesto di Catania 272
Fig. 130 Valori di attenuazione delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) 273
Fig. 131 Valori di attenuazione delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) 275
Fig. 132 Valori di attenuazione delle pareti sud calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) nel contesto di Grosseto 276
Fig. 133 Valori di attenuazione delle pareti sud calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) nel contesto di Bologna 277
Fig. 134 Valori di attenuazione delle pareti sud calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) nel contesto di Catania 277
Fig. 135 *Texture* ad elementi lapidei irregolari 282
Fig. 136 Murature del Foro di Alba Fucens e del Santuario della Fortuna Primigenia di Palestrina 283
Fig. 137 Viste delle murature delle sostruzioni del Tempio di Giove Anxur 283
Fig. 138 Apparecchiatura muraria irregolare in pietre grezze 283
Fig. 139 Dettaglio del prospetto della Haus 9x9 284
Fig. 140 Dettaglio del prospetto della House in the Landscape 284
Fig. 141 Il muro a gabbioni della sede del circolo del London Regatta Centre 284
Fig. 142 *Texture* ad elementi lapidei arrotondati 285
Fig. 143 Muro di ciottoli 285
Fig. 144 Dettaglio del prospetto della Shoreham Beach House 286
Fig. 145 *Texture* ad elementi lapidei sbozzati 286
Fig. 146 Apparecchiatura muraria ad elementi sbozzati 287
Fig. 147 Muro ad elementi stratificati 287
Fig. 148 Muro di terrazzamento a Brenzone sul Garda (VR, Italia) 287
Fig. 149 Blackrock Police Training Centre 288
Fig. 150 Palladiane 288
Fig. 151 Vista dell'esterno della Shoreham Beach House e dettaglio del prospetto 289
Fig. 152 Vista dell'esterno dell'edificio Château-le-lez e vista dall'alto di una delle logge 290

Fig. 153 Dettaglio costruttivo della sezione verticale dell'edificio Haus 9x9, che illustra la soluzione adottata per realizzare un rivestimento continuo funzionale allo smaltimento delle acque meteoriche 291
Fig. 154 Dettaglio costruttivo della sezione verticale dell'edificio Haus 9x9, che illustra la soluzione adottata per l'inserimento di aperture opache zenitali rivestite in legno di quercia 291
Fig. 155 Dettaglio costruttivo della sezione verticale dell'edificio Haus 9x9, che illustra la soluzione adottata per l'inserimento di aperture vetrate zenitali collegate con le finestre presenti sulle pareti verticali.....292
Fig. 156 a-b Dettagli costruttivi che illustrano la soluzione adottata nell'edificio Sei Unità per realizzare un rivestimento continuo funzionale anche allo smaltimento delle acque meteoriche ...293
Fig. 157 Dettaglio costruttivo che illustra la soluzione adottata nell'edificio Sei Unità per alternare il rivestimento in frantumato lapideo-laterizio con il rivestimento in rame.....293
Fig. 158 a-b Dettagli costruttivi delle sezioni verticali dell'edificio House in the Landscape, che illustrano la soluzione adottata per lo smaltimento delle acque meteoriche e l'accostamento dei rivestimenti in gabbioni ed in metallo.....294
Fig. 159 Dettaglio costruttivo che illustra la soluzione adottata nell'House in the Landscape per l'inserimento di un'apertura vetrata nella parete con rivestimento a gabbioni.....295
Fig. 160 Dettaglio costruttivo che illustra la soluzione adottata nell'edificio Logements Les Galets per l'inserimento di un'apertura vetrata nella parete con rivestimento litico 295

INDICE DELLE TABELLE

Tabella. 1 Quote di mercato all'export nel settore mondiale della pietra naturale di Italia e Cina ...35
Tabella. 2 Applicabilità dei principali trattamenti superficiali alle diverse tipologie di pietre naturali ...74
Tabella. 3 La classificazione definita dal DM 26/6/2009 in relazione alla qualità termica estiva dell'involucro edilizio ...205
Tabella. 4 Caratteristiche degli elementi costruttivi ...214
Tabella. 5 Validazione dei risultati delle simulazioni condotte con Design Builder e MC 11300 ..215
Tabella. 6 Energia totale consumata in un anno per i diversi casi di simulazione...216
Tabella. 7 Il tempo di ritardo (φ) e i valori di attenuazione (*f*) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio) ...221
Tabella. 8 I tre contesti di studio scelti per le simulazioni dinamiche ...222
Tabella. 9 Energia totale consumata in un anno per i diversi casi di simulazione...223
Tabella. 10 Il tempo di ritardo (φ) e i valori di attenuazione (*f*) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio) ...228
Tabella. 11 Energia totale consumata in un anno per i diversi casi di simulazione...229
Tabella. 12 Il tempo di ritardo (φ) e i valori di attenuazione (*f*) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio) ...234
Tabella. 13 Consumi energetici annuali per il riscaldamento per i cinque casi di simulazione nei tre contesti di studio ...235
Tabella. 14 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento relative agli involucri tradizionali (casi T[40], T[60]) e agli involucri innovativi analizzati (casi I[Zum], I[Abr], I[Ber]), calcolate nei tre contesti di studio ...235
Tabella. 15 Consumi energetici annuali per il raffrescamento per i cinque casi di simulazione nei tre contesti di studio ...236
Tabella. 16 Medie dei consumi energetici annuali per il raffrescamento relative agli involucri tradizionali (casi T[40], T[60]) e agli involucri innovativi analizzati (casi I[Zum], I[Abr], I[Ber]), calcolate nei tre contesti di studio ...236
Tabella. 17 I valori di attenuazione (*f*) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione nei tre contesti di studio, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio) ...238
Tabella. 18 I valori del tempo di ritardo (φ) valutati per le pareti sud dei quattro casi di simulazione nei tre contesti di studio, considerando le massime temperature superficiali esterne ed interne raggiunte in un tipico giorno estivo (31 Luglio) ...238
Tabella. 19 Casi di simulazione con indicazione della stratigrafia, dello spessore del gabbione, del tipo di pietra di riempimento e del rapporto tra il volume dei vuoti (Vv) e il volume totale del modulo costruttivo (Vt) ...249
Tabella. 20 Principali proprietà delle due tipologie di pietra selezionate per l'analisi ...250
Tabella. 21 Proprietà calcolate nella seconda fase del metodo di modellazione e utilizzate per definire nella libreria di Design Builder otto materiali equivalenti termicamente omogenei ...251
Tabella. 22 Valori della trasmittanza termica delle pareti esterne degli otto casi di simulazione caratterizzati dalla stratigrafia 1 ...252

Tabella. 23 Valori della trasmittanza termica delle pareti esterne degli otto casi di simulazione caratterizzati dalla stratigrafia 2 252
Tabella. 24 Energia annuale per il riscaldamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 254
Tabella. 25 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare 255
Tabella. 26 Energia annuale per il riscaldamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 255
Tabella. 27 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare 256
Tabella. 28 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2 256
Tabella. 29 Energia annuale per il raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 257
Tabella. 30 Medie dei consumi energetici annuali per il raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare 257
Tabella. 31 Energia annuale per il raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 258
Tabella. 32 Medie dei consumi energetici annuali per il raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare 258
Tabella. 33 Medie dei consumi energetici annuali per il riscaldamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2 259
Tabella. 34 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 259
Tabella. 35 Medie dei consumi energetici annuali per riscaldamento e raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare 260
Tabella. 36 Energia annuale totale per riscaldamento e raffrescamento per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 261
Tabella. 37 Medie dei consumi energetici annuali per riscaldamento e raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare 261
Tabella. 38 Medie dei consumi energetici annuali per riscaldamento e raffrescamento dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2 262
Tabella. 39 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 264
Tabella. 40 Medie delle temperature operative di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare 265
Tabella. 41 Temperature operative medie in un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 266
Tabella. 42 Medie delle temperature operative di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare 266
Tabella. 43 Medie delle temperature operative di un tipico giorno invernale (12 Gennaio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2 267
Tabella. 44 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 269
Tabella. 45 Medie delle temperature operative di un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare 269
Tabella. 46 Temperature operative medie in un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 270
Tabella. 47 Medie delle temperature operative di un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare 270

Tabella. 48 Medie delle temperature operative di un tipico giorno estivo (31 Luglio) per i casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2 271
Tabella. 49 Valori di attenuazione e tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) 273
Tabella. 50 Medie dei valori di attenuazione e del tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 con riempimento in basalto e in calcare, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) 274
Tabella. 51 Valori di attenuazione e tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) 274
Tabella. 52 Medie dei valori di attenuazione e del tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 2 con riempimento in basalto e in calcare, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) 275
Tabella. 53 Medie dei valori di attenuazione e del tempo di ritardo delle pareti sud dei casi caratterizzati dalla stratigrafia 1 e 2, calcolati per un tipico giorno estivo (31 Luglio) 276
Tabella. 54 Indicazioni progettuali per il clima di Grosseto basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione energetica 279
Tabella. 55 Indicazioni progettuali per il clima di Grosseto basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione termica 279
Tabella. 56 Indicazioni progettuali per il clima di Bologna basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione energetica 280
Tabella. 57 Indicazioni progettuali per il clima di Bologna basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione termica 280
Tabella. 58 Indicazioni progettuali per il clima di Catania basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione energetica 280
Tabella. 59 Indicazioni progettuali per il clima di Catania basate sulla correlazione tra valori delle variabili analizzate e prestazione termica 281

ABSTRACT

La pietra naturale per secoli ha avuto un ruolo centrale nel progetto di architettura ma con la diffusione del calcestruzzo e dell'acciaio è stata impiegata prevalentemente in elementi sottili di rivestimento. Attualmente, però, c'è stata nella cultura architettonica contemporanea una riscoperta della pietra massiva attraverso il recupero e l'attualizzazione della tecnica costruttiva tradizionale della muratura e la diffusione delle tecniche innovative della pietra armata precompressa e dei gabbioni. Molti progettisti sono tornati, infatti, ad impiegare la pietra in spessori rilevanti, spesso in combinazione con altri materiali, per realizzare pareti perimetrali verticali, coperture e strutture in elevazione. Il rinnovamento del linguaggio architettonico è legato al riconoscimento delle potenzialità della pietra massiva connesse a valori espressivi e di sostenibilità economica ed ambientale: l'uso massivo della pietra naturale, infatti, è motivato non solo dall'esigenza di integrarsi con il paesaggio o esprimere l'identità locale ma anche dalla possibilità di realizzare con costi e tempi di costruzione contenuti elementi tecnici durevoli, dotati di elevata inerzia termica, facilmente riciclabili o ottenuti attraverso il recupero o il riciclo di materiale lapideo di scarto. Questo rinnovamento è stato consentito dalle molteplici innovazioni che hanno interessato il settore lapideo. In particolare, la diffusione dei sistemi CAD/CAM/CNC, il passaggio dalla stereotomia alla stereotomia digitale legata anche a *software* di progettazione parametrica e la disponibilità di programmi di calcolo e di metodi di *form-finding* basati su modelli digitali e non più su modelli fisici hanno permesso di realizzare prodotti lapidei di forma complessa con tempi e costi di fabbricazione ridotti e di ampliare le possibilità di ricerca formale dei progettisti.

La prima parte della ricerca esamina alcuni dei metodi e degli strumenti innovativi che hanno contribuito alla riscoperta della pietra massiva nella cultura architettonica contemporanea e analizza, attraverso il riferimento a casi di studio, i caratteri delle tecniche costruttive della muratura, della pietra armata e dei gabbioni per definire un quadro di riferimento tecnologico-scientifico sui materiali lapidei: vengono messe a sistema, infatti, le conoscenze relative ai materiali lapidei naturali e artificiali (lapidei agglomerati; calcestruzzi realizzati con gli scarti di estrazione o di lavorazione dei lapidei naturali), alle tecniche di lavorazione, ai metodi e agli strumenti di progettazione e ai linguaggi progettuali contemporanei.

La seconda e la terza parte della ricerca evidenziano alcune delle potenzialità di involucri lapidei massivi innovativi. La seconda parte della ricerca è dedicata allo studio scientifico-quantitativo dell'importanza dell'inerzia termica del materiale per il miglioramento delle condizioni di comfort termico interno e per la riduzione della domanda energetica degli edifici: attraverso simulazioni dinamiche annuali eseguite su un edificio residenziale di progetto sono stati valutati, infatti, i vantaggi prestazionali connessi con l'adozione, in diverse condizioni climatiche, di involucri massivi innovativi rispetto ad involucri lapidei tradizionali. La terza parte della ricerca, invece, indaga le valenze prestazionali e i caratteri architettonici di involucri edilizi a gabbioni. Attraverso simulazioni dinamiche annuali eseguite sullo stesso modello studiato nella seconda parte della tesi, vengono individuate delle correlazioni tra le principali caratteristiche di involucri multistrato a gabbioni e la prestazione termico-energetica dell'edificio: sulla base delle correlazioni individuate vengono definite delle indicazioni per valutare l'appropriatezza delle scelte compiute in fase di progettazione della soluzione costruttiva al fine di minimizzare la domanda energetica per il riscaldamento e il raffrescamento dell'edificio e migliorare le condizioni di comfort termico interno. Infine, attraverso il riferimento ad architetture contemporanee e l'individuazione di analogie figurative con opere e manufatti realizzati con tecniche costruttive tradizionali, vengono evidenziati i caratteri architettonici

di involucri edilizi a gabbioni legati alle possibili tipologie di *texture* del riempimento litico dei moduli costruttivi e alle specifiche soluzioni progettate per la risoluzione di problemi connessi con l'inserimento di aperture vetrate o di altri materiali di rivestimento e con lo smaltimento dell'acqua piovana.